

# Versuche zur Weiterentwicklung der Kalt-Preßschweißung und Kalt-Preßlötung

Burat, Fritz  
Hofmann, Wilhelm

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 8, 1956, S.85-98



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

# Versuche zur Weiterentwicklung der Kalt-Preßschweißung und Kalt-Preßlötung

Von Fritz Burat und Wilhelm Hofmann

Mit 13 Abbildungen

*Summary: Cold-welding of steel can be achieved by putting sheets of softer metals between the two steel pieces so that the sheet material and the steel as well will be deformed. In experiments with aluminium sheets of different thicknesses the best results — tensile strength of the joints 10 to 20 kg/mm<sup>2</sup> — were obtained when applying a thickness of 3 or 4 mm. With tin of variable thicknesses a tensile strength of 4 to 8 kg/mm<sup>2</sup> and with copper sheets a value of 14 to 26 kg/mm<sup>2</sup> could be obtained. Our experiments showed that the deformation of the steel was promoted by the interposed softer metal. Fracture occurred in the contact zone of the two metals. However thin iron particles were torn off with growing deformation and growing thickness of the sheet material, i. e. aluminium or copper.*

Von der Preßschweißung, bei der „die Zusammenfügung der beiden Stoffteile unter Anwendung von Druck im teigigen Zustand vor sich geht“ [1], führte die Entwicklung über verschiedene Zwischenstadien zur Preßschweißung bei Raumtemperatur. Nach dem zweiten Weltkrieg erschienen in der englischen Fachliteratur Berichte, denen zufolge es gelungen war, Metalle bei Raumtemperatur unter Anwendung von hohem Druck zu verbinden. Grundsätzliche Untersuchungen wurden dann auch an dieser Stelle [2] durchgeführt. Die zu verschweißenden Metallflächen mußten von jeglichen Überzügen (Oxyde, Fett usw.) gesäubert werden. Unter Anwendung eines hohen Druckes, unter dem sich die zu verbindenden Oberflächen stark verformen, gelang es dann, eine einwandfreie Schweißverbindung herzustellen. Zunächst wurden Überlappschweißungen an Aluminium, Al-Mg-Si (Pantal), Kupfer, Blei, Zinn und Zink durchgeführt. Es gelang ferner, das gut verformbare Armco-Eisen und 18/8 Chrom-Nickel-Stahl auf diese Weise zu verschweißen. Auch Verbindungen ungleichartiger Metalle konnten hergestellt werden. So wurde Aluminium mit Zinn bzw. mit Kadmium trotz gegenseitiger Unlöslichkeit im festen Zustand verschweißt. Dem Verfahren der Überlappschweißung haften aber verschiedene Nachteile an. Die Schweißstelle erfährt eine sehr starke Schwächung des Querschnitts, außerdem ist es schwierig, die wahre Festigkeit des Verbundes zu ermitteln. Als neues Verfahren wurde daher die Kalt-Preßstumpfschweißung entwickelt [2]. Auf diese Weise wurden zylindrische Proben aus Aluminium, Kupfer und Blei verschweißt. Auch die Verbindung von Aluminium mit Kupfer gelang bei entsprechender Formgebung des Kupfers. Infolge der Kalthärtung der verformten Nahtzonen lagen die erzielten Festigkeitswerte noch über denjenigen des ungeschweißten Werkstoffes.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Kalt-Preßschweißung wurde eine Stumpfschweißung von Armco-Eisen versucht [3]. Trotz Anwendung größter Drücke und entsprechender Verformungen gelang es nicht, eine Verbindung zu erzielen, obwohl eine Überlappschweißung vorher zum Erfolg geführt hatte.

Daraufhin wurde zwischen die Stirnflächen zweier Zylinderstäbe aus Armco-Eisen eine Aluminiumronde gelegt. Auf diese Weise gelang eine Verschweißung zwischen dem Aluminium und den Eisenstäben und damit indirekt eine Verbindung von Eisen bzw. Stahl. Ebenso ließ sich Aluminium mit Hilfe von zwischengelegten Bleifolien verbinden. Die neue Arbeitsweise erhielt als technologisches Verfahren die Bezeichnung Kalt-Preßlötten. Die zahlreichen durchgeführten Versuche mit Aluminiumronden ergaben noch stark streuende Festigkeiten der Verbindungen im Bereich von 0 bis 16 kg/mm<sup>2</sup>.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Weiterentwicklung der Kalt-Preßlötung. Es sollte versucht werden, einen einwandfreien Verbund zwischen Armco-Eisen und einem eingelegten Rondenwerkstoff herzustellen und dann die Abhängigkeit der Zugfestigkeit des Verbundes von der Oberflächenvergrößerung beider Metalle und von der Rondendicke zu klären. Als Rondenwerkstoffe standen Reinstaluminium 99,99%, Reinaluminium 99,5%, Elektrolytkupfer und Reinzinn zur Verfügung. Aus Blechen verschiedener Dicke wurden die Ronden von 10 mm Durchmesser mit einem in eine Kurbelpresse eingebauten Schnittwerkzeug ausgeschert.

### Versuchsdurchführung

Die Kalt-Preßschweißversuche wurden mit einer von *B. Valentin* [4] konstruierten Vorrichtung durchgeführt (Abb. 1). Ober- und Unterstempel werden in einer langen Hülse geführt. Dadurch wird eine zentrische Lagerung der zu verschweißenden Rundstäbe gewährleistet und ein Kanten des Oberstempels verhindert, der sich beim Pressen verschiebt. Als Aufnehmer für die Rundstäbe sind in die Stempel gehärtete Kegelhalbschalen eingesetzt. Sie sind geteilt, um ein leichtes Ausbauen der verschweißten Probe — ohne Biegebeanspruchung

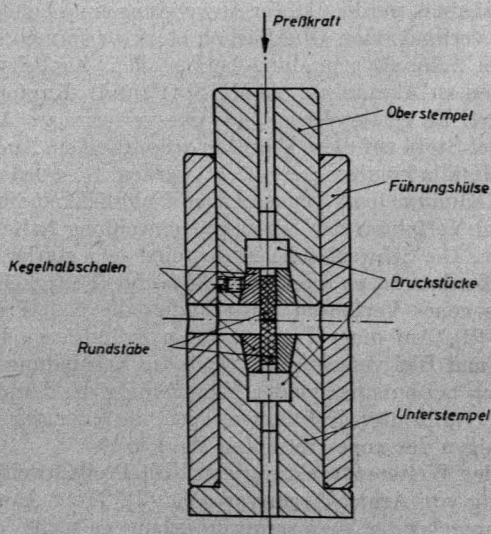


Abb. 1. Vorrichtung zum Kalt-Preßschweißen

der Schweißnaht — zu ermöglichen. Abb. 2 zeigt den Vorgang der Stauchung. Der Überstand der 28 mm langen Rundstäbe beträgt 9 mm. Zunächst verformt sich die eingelegte Ronde, der Werkstoff fließt zwischen den Eisenflächen radial nach außen. Durch die Kaltverformung wird der Fließwiderstand des

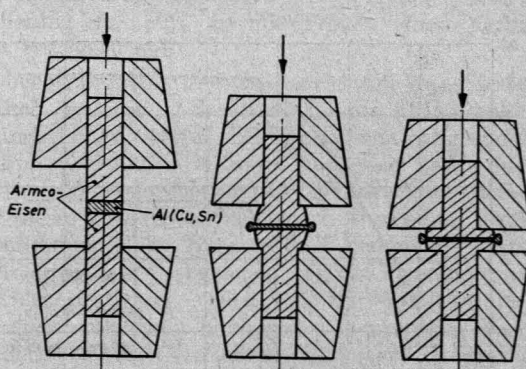


Abb. 2. Verformungsvorgang bei der Kalt-Preßlötung

Rondenwerkstoffes so erhöht, daß sich schließlich auch die Eisenzyylinder verformen. Es bilden sich zwei Wülste aus Armco-Eisen, umgeben von einem Ring aus Rondenwerkstoff. Nach Erreichen der gewünschten Belastung wird kurzzeitig entlastet und die geschweißte Probe ausgebaut.

### Untersuchungen an Ronden aus Reinstaluminium

Die Grundlage der Arbeit bildeten zahlreiche Versuche an 3 mm dicken Ronden über einen weiten Bereich von 4 bis 25 t Preßkraft — entsprechend 30 bis 300% Oberflächenvergrößerung des Eisens. Auf Abb. 3. sind die einzelnen

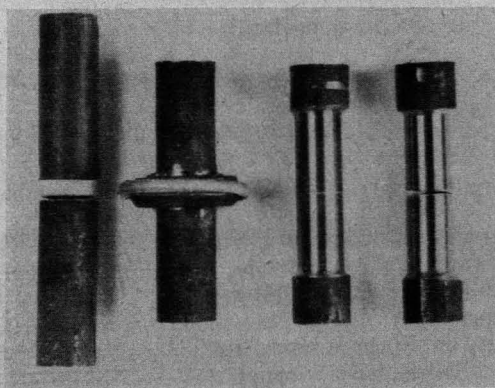


Abb. 3. Kalt-Preßlötung von Armco-Eisen mit 3 mm dicken Ronden aus Al 99,99%. Preßkraft 20 t. Darstellung von der ungeschweißten Probe bis zum zerrissenen Stab

Stufen des Versuchs von den Rundstäben und der eingeleigten Ronde bis zum zerrissenen Stab zu sehen. Durch diese Versuchsreihe sollte der Kurvenverlauf im Zugfestigkeit-Verformung-Schaubild möglichst genau ermittelt werden (Abb. 4). Es wurden jeweils drei Versuche mit gleicher Preßkraft durchgeführt.

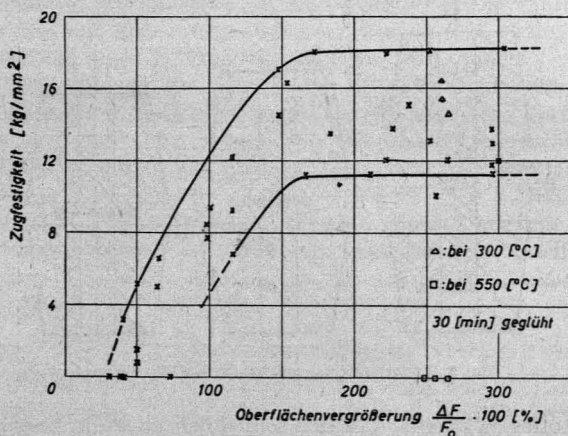


Abb. 4. Schaubild Zugfestigkeit-Verformung für die Kalt-Preßlötung von Armco-Eisen mit 3 mm dicken Rondens aus Al 99,99%

Wegen der starken Streuung der Ergebnisse, auf die noch eingegangen wird, wurde jedoch von einer Mittelwertbildung abgesehen und zur Kennzeichnung des Kurvenverlaufs ein Streuband gelegt.

Die Oberflächenvergrößerung beim Kaltpreßschweißen ist definiert als

$$\frac{\text{Wulstfläche} - \text{Ausgangsfläche}}{\text{Ausgangsfläche}} \cdot 100\%$$

In erster Linie wurde nur die Oberflächenvergrößerung des Armco-Eisens

$$\frac{F - F_0}{F_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta F}{F_0} \cdot 100\% \quad \text{ausgewertet, diejenige des Rondenswerkstoffes}$$

$\frac{\Delta F_1}{F_0}$  wurde aber mit vermerkt. Die Flächen  $F_0$  und  $F$  ergaben sich aus den

Durchmessern  $d_0$  und  $d$  nach Abb. 5. Für die Zerreißproben wurde die Schulterstabsform gewählt (Abb. 3). Zur Ausschaltung einer Biegebeanspruchung der Zerreißstäbe baute man sie in Büchsen ein, die an Ketten hingen. Beim Zerreißversuch ergab sich ein Trennbruch ohne meßbare Bruch einschnürung.

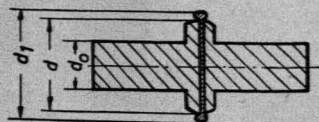


Abb. 5. Bezeichnungen beim Ausmessen der Oberflächenvergrößerungen



Aus Abb. 4 ist ersichtlich, daß bereits bei einer Oberflächenvergrößerung des Eisens von 40% (auf den tatsächlichen Querschnitt  $F$  bezogener Enddruck  $p = 43,7 \text{ kg/mm}^2$ , Oberflächenvergrößerung des Aluminiums = 134%) ein Verbund eingetreten ist. Abgesehen von einer Probe mit 73% Oberflächenvergrößerung, die durch unvorsichtiges Drehen zerfiel, weisen von einer Oberflächenvergrößerung von 50% an alle Proben einen Verbund mehr oder weniger großer Festigkeit auf.

Als wesentliches Ergebnis dieser Versuchsreihe kann festgestellt werden: Das Zugfestigkeit-Verformung-Schaubild für die Kalt-Preßlötung weist denselben charakteristischen Verlauf auf, wie das erstmalig von Ruge [2] für die Kalt-Preßstumpfschweißung ermittelte. Von einer bestimmten Oberflächenvergrößerung bzw. von einem bestimmten Preßdruck an tritt ein Verbund ein. Die Festigkeit dieses Verbundes steigt durch Anwendung größerer Preßkräfte bis zu einer bestimmten Höhe. Eine weitere Zunahme der Festigkeit durch Erhöhung der Preßkraft ist — abgesehen von einer geringen Steigerung durch zunehmende Kaltverfestigung — nicht möglich, so daß sich nun im Zugfestigkeit-Verformung-Schaubild ein horizontaler Verlauf des Kurvenbandes einstellt. Die in den Versuchen erreichten Maximalwerte der Zugfestigkeit von  $18,0 \text{ kg/mm}^2$  stimmen mit Angaben über die Trennfestigkeit von Reinstaluminium sehr gut überein [5], [6].

Eine mit 10 t Preßkraft ( $p = 53,7 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\frac{\Delta F}{F_0} = 147\%$ ,  $\frac{\Delta F_1}{F_0} = 250\%$ ) hergestellte Probe wurde metallographisch untersucht. Das Gefüge (Abb. 6)

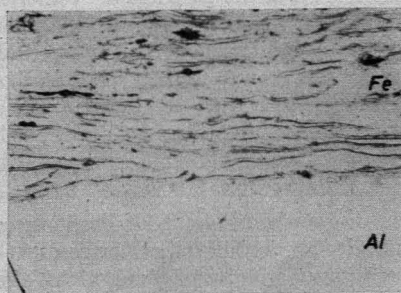


Abb. 6. Kalt-Preßlötverbindung von Armco-Eisen mit 3 mm dicker Ronde aus Al 99,99%. Guter Verbund; zwei kleine Oxydeinschlüsse. Eisen mit deutlichen Gleitlinien. Fe:  $\text{HNO}_3$ . Al: ungeätzt. 500:1

zeigt eine sehr gute Stelle des Verbundes mit nur zwei sehr kleinen Fehlern, vermutlich Oxydeinschlüssen. Man beachte außerdem die erkennbare starke Verformung des Armco-Eisens.

In weiteren Versuchsreihen wurden Rondendicken von 2; 1; 0,5 und 0,3 mm verwendet. Die Zugfestigkeit-Verformung-Schaubilder zeigten wieder den charakteristischen Verlauf analog Abb. 4. Doch nahm mit abnehmender Dicke der eingelegten Ronde auch die Festigkeit der Verbindung ab. Die im Kurvenanstieg liegenden Werte ließen außerdem erkennen, daß der Beginn der Verschweißung in das Gebiet höherer Oberflächenvergrößerung verschoben war.

Zur Darstellung der Ergebnisse in Abb. 7 wurde aus sämtlichen Meßergebnissen im horizontalen Streubandbereich jeder Versuchsreihe je ein Mittelwert gebildet und durch diesen die Horizontale gelegt.

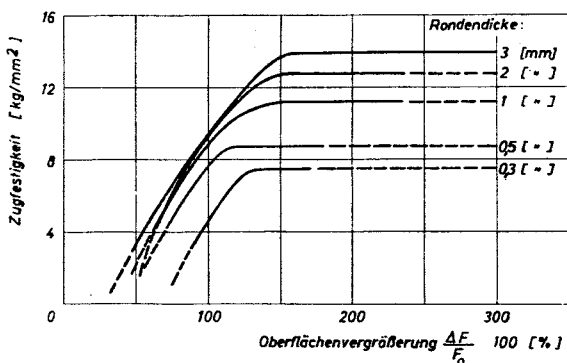


Abb. 7. Schaubild Zugfestigkeit-Verformung für die Kalt-Preßlötung mit verschieden dicken Ronden aus Al 99,99%

Bei einer herkömmlichen Lötverbindung nimmt die Bruchfestigkeit mit abnehmender Lötspaltbreite zu [7]. Dies ist durch eine zunehmende Behinderung der Querkontraktion des Lotes zu erklären, wodurch die im Zerreißversuch ermittelte Festigkeit sich der „wahren Festigkeit“ nähert. Voraussetzung ist natürlich, daß der Grundwerkstoff von größerer Festigkeit als der Lotwerkstoff ist. Da aus Herstellungsgründen nicht beliebig geringe Spaltbreiten ausgeführt werden können, ist die Trennfestigkeit des Lotes bisher nicht erreicht worden<sup>1)</sup>. Beim Extrapolieren von Kurven, die man aus der Auftragung der Festigkeit über der Spaltbreite erhält, sollen sich aber nach Colbus [7] für unendlich kleine Spaltbreiten Festigkeitswerte ergeben, die größenordnungsmäßig der Trennfestigkeit entsprechen.

Man kann erwarten, daß auch bei der Kalt-Preßlötung die Festigkeit der Verbindung — einwandfreie Verschweißung vorausgesetzt — mit abnehmender Enddicke der Ronde zunimmt oder wenigstens nicht abnimmt. Wenn man von dieser, noch durch eine besondere Versuchsreihe zu beweisenden Annahme ausgeht, wird man das scheinbar gegenteilige Ergebnis nach Abb. 7 so erklären, daß die Güte der Verschweißung mit abnehmender Rondenausgangsdicke mehr und mehr abfällt. Um dies verständlich zu machen, muß man das Ergebnis von Abb. 7 noch erläutern und durch einige zusätzliche Beobachtungen ergänzen.

Eine gleiche Endlotdicke von 0,2 mm wurde bei einer 3 mm-Probe durch 25 t Preßkraft, bei einer 0,5 mm-Probe durch 10 t Preßkraft erzielt. Bei je drei Versuchen ergaben sich für die 3 mm-Probe Bruchfestigkeiten von 12,0; 13,7 und 18,2 kg/mm², für die 0,5 mm-Probe 6,2; 9,4 und 12,0 kg/mm². Auch bei der 0,5 mm-Probe liegen die angeführten Werte bereits im horizontalen Streubandbereich; es ist also bei dieser Rondendicke durch Erhöhung

<sup>1)</sup> Die kleinste verwendete Lötspaltbreite liegt jedoch schon bei 0,005 mm.

des Druckes und damit der Verformung des Aluminiums und des Stahles keine Festigkeitssteigerung mehr zu erzielen.

Weiter gilt, daß bei gleichem Preßdruck mit geringerer Dicke der eingelegten Ronde während des Preßvorganges weniger Aluminium aus dem Lötspalt fließen kann. Eine geringere Verformung des Aluminiums hat überdies eine geringere Oberflächenvergrößerung des Eisens zur Folge, wie man Abb.8 entnehmen kann, die auch die gleichzeitige Abnahme der Festigkeit gut erkennen läßt. Die Oberflächenvergrößerung des Aluminiums nähert sich mit abnehmender Rondendicke derjenigen des Eisens. Damit verringert sich auch

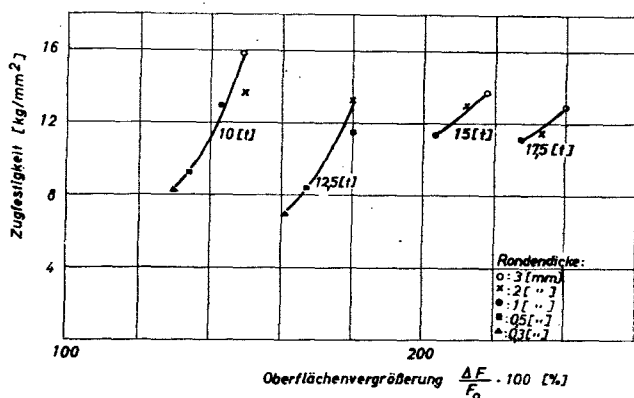


Abb. 8. Schaubild Zugfestigkeit-Verformung für die Kalt-Preßlötung mit verschiedenen dicken Ronden aus Al 99,99%. Preßkraft als Parameter, eingezeichnete Werte sind Mittelungen aus je drei Versuchen.

die Relativbewegung des Aluminiums zum Eisen. Besonders aufschlußreich ist der Vergleich der Proben mit 1 und 0,5 mm Ausgangsdicke der Ronden. Die Versuchsergebnisse bei verschiedenen Preßdrücken zeigen, daß bei gleicher Oberflächenvergrößerung des Aluminiums — wobei die Oberflächenvergrößerung des Eisens für die 0,5 mm-Probe sogar größer ist als für die 1 mm-Probe — die Festigkeit der Verbindung aus 0,5 mm-Ronden (Preßkraft 12,5 t) unter der Festigkeit einer Verbindung aus 1 mm-Ronden (Preßkraft 10,0 t) liegt. Hieraus kann man folgern, wie dies schon früher aus anderen Beobachtungen geschehen ist [3], daß die für das Zustandekommen der Kaltschweißung notwendige Oberflächenreinigung und die Oberflächenvergrößerung zwei getrennte Voraussetzungen darstellen. Der Sinn der Oberflächenvergrößerung liegt also nicht nur darin, daß sie zu einem Zerreißen der Oxydhäute und Fettschichten und zu einer Verschiebung von jungfräulichem, d. h. mit der Atmosphäre noch nicht in Berührung gewesenen Werkstoff, an die Oberfläche führt. Für die Verbindung von Stahl und Aluminium ergibt sich vielmehr die Tatsache, daß die Verschweißung um so gründlicher erfolgt, je weniger die beiden Metalle bei der notwendigen Vergrößerung ihrer Berührungsfläche verfestigt sind.



### Versuche an Aluminium 99,5, an Zinn und Kupfer

Die Zugfestigkeit-Verformung-Schaubilder zeigen wieder den bereits besprochenen Verlauf. Die maximal erzielten Festigkeitswerte bei 4; 2 und 1 mm dicken Ronden aus Al 99,5 betragen 20 kg/mm<sup>2</sup>. Sie stimmen wiederum sehr gut mit Angaben über die Trennfestigkeit von Reinaluminium überein [5], [6]. In Abb. 9 sind die Versuchsergebnisse für die Kaltpreßlötung mit 4 und

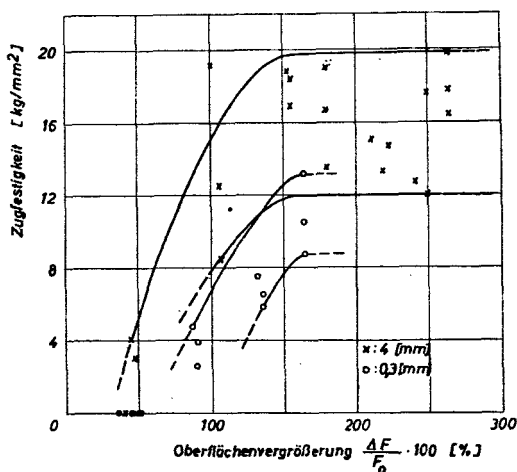


Abb. 9. Schaubild Zugfestigkeit-Verformung für die Kalt-Preßlötung mit 4 und 0,3 mm dicken Ronden aus Al 99,5%

0,3 mm dicken Ronden gemeinsam aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Festigkeit mit kleiner werdender Rondendicke abnimmt und die Verschweißung erst bei stärkeren Oberflächenvergrößerungen beginnt.

Neben Aluminium ließ sich auch das stark verformbare Zinn sehr gut mit dem Armco-Eisen verbinden. Erwartungsgemäß ergab sich in den Schaubildern Zugfestigkeit-Verformung wieder der bekannte Verlauf. Es wurden Versuchsreihen mit 1 und 0,5 mm Rondendicke durchgeführt. Dabei war die Lotdicke für die 0,5 mm-Proben bei 12,5 t Preßkraft mit einigen 0,01 mm bereits so gering, daß die Proben teilweise beim Drehen im Lot rissen. Dies ist neben der geringen Festigkeit des Zinns auch durch die bei Raumtemperatur stattfindende Rekristallisation zu erklären. Bei Oberflächenvergrößerungen des Stahles von 100% und darüber ließen sich Festigkeiten der Verbindungen bis 8,3 kg/mm<sup>2</sup> erzielen. Diese Festigkeitswerte liegen erheblich über der Zugfestigkeit des Zinns, die im Schrifttum mit 2 bis 3 kg/mm<sup>2</sup> angegeben wird. Werte der Trennfestigkeit von Zinn waren nicht zu finden. Ein Unterschied in der Festigkeit war bei den verwendeten Rondendicken von 0,5 und 1 mm nicht zu ersehen. Dies ist in Übereinstimmung mit den bei Reinaluminium angestellten Betrachtungen.

Die Kalt-Preßlötung mit Elektrolytkupfer bereitete zunächst Schwierigkeiten. Mit Ronden von 1 mm Dicke konnte kein Verbund erzielt werden. Dabei wurde Folgendes beobachtet: Bei einer Preßkraft von 15 t trat ein leichter Verbund ein. Die Proben hielten dem Ausbau aus der Vorrichtung stand, konnten jedoch von Hand zerrissen werden. Man bemerkte, daß im Zentrum der Schweißfläche ein kreisförmiges Gebiet von etwa 5 mm Durchmesser gebunden hatte. Der Verbund war so stark, daß beim Zerreißen ein Stück des Lotes von ungefähr 1 mm Durchmesser aus der Ronde gerissen wurde und auf dem anderen Rundstab aus Armco-Eisen haften blieb. An den übrigen Stellen der begonnenen Verschweißung haftete auf dem Eisen eine dünne Kupferschicht, umgekehrt auf dem Kupfer eine dünne Eisenschicht, was wegen der Farbunterschiede beider Metalle gut zu erkennen war. Bei weiterer Steigerung der Preßkraft auf 17,5 und auf 20 t zeigten die Proben nicht mehr dieses leichte „Kleben“; beim Ausbau aus der Vorrichtung konnte keine Spur von Haftung festgestellt werden. Doch waren im Zentrum der Schweißfläche wieder kreisförmige Gebiete zu sehen, in denen dünne Kupferschichten auf dem Eisen und umgekehrt saßen. Eine gewisse Verschweißung hatte also begonnen, sich dann aber nicht mehr fortgesetzt, und bei weiterer Oberflächenvergrößerung war der leichte Verbund wahrscheinlich wieder zerrissen. Dies läßt wieder den Schluß zu, daß die Oberflächenvergrößerung nicht nur zur Entfernung verbliebener Oxydschichten notwendig ist, sondern auch von wesentlichem Einfluß auf die Verschweißung überhaupt, daß die Verschweißung ferner schon beginnen muß, wenn die Werkstoffe noch nicht zu stark

verfestigt sind. Dementsprechend gelang auch die Kalt-Preßlötung mit 2 und 3 mm dicken Ronden. Hierbei fließt der Ronden-Werkstoff stärker aus dem Lötspalt, und es werden von Oxyden freie Oberflächen bereits zur Berührung kommen, wenn Kupfer und Eisen noch nicht zu stark verfestigt sind. Das Zugfestigkeit-Verformung-Schaubild für die Kalt-Preßlötung mit 3 mm dicken Ronden zeigt wieder den bekannten Verlauf (Abb. 10). Bemerkenswert war, daß für die Rondendicke 2 mm die Verschweißung erst bei erheblich stärkerer Oberflächenvergrößerung des Eisens begann als bei der Rondendicke 3 mm. Bei entsprechender Abstufung der Rondendicke beim Aluminium war der Unterschied bedeutend geringer. Die Versuche wurden nicht auf größere Preßkräfte ausgedehnt, so daß der horizontale Kurvenverlauf nicht ermittelt werden konnte. Es ist jedoch nicht anzunehmen, daß die erreichten Festigkeitswerte von bis 26,5 kg/mm<sup>2</sup> durch größere Verformung noch stark übertriffen werden können.

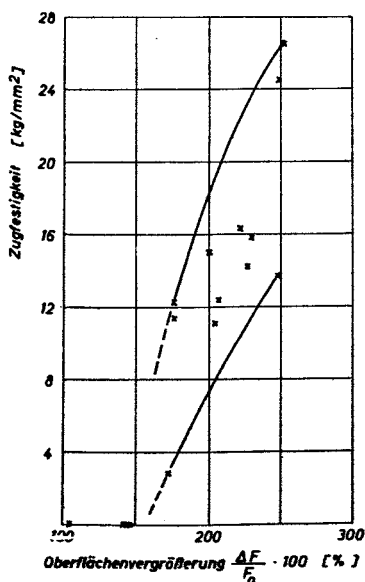


Abb. 10. Schaubild Zugfestigkeit-Verformung für die Kalt-Preßlötung mit 3 mm dicken Ronden aus Elektrolytkupfer

Wenn die Verbindung von Stahl mit Hilfe von Kupferronden zwar absolut gesehen höhere Festigkeiten ergibt als sie bei Einsatz von Aluminium oder gar Zinn als Lotwerkstoff möglich sind, so entspricht der Erfolg bei der Verwendung von Kupfer doch nicht den gestellten Erwartungen, denn die Trennfestigkeit von Kupfer, im Schrifttum mit  $44 \text{ kg/mm}^2$  [5] angegeben, wird in den Kalt-Preßlötungen keineswegs erreicht. Dies wird man nach dem oben Gesagten mit der starken Verfestigung von Kupfer bei der Kaltverformung in Zusammenhang bringen. Angaben hierüber und Vergleiche mit dem Verhalten von Stahl und Aluminium können dem Schrifttum entnommen werden [8].

### Beobachtungen beim Zerreivorgang

Beim Zerreißen der zahlreichen unter Verwendung von Aluminium hergestellten Verbindungen wurden einige Beobachtungen gemacht, die einer Erörterung bedürfen. Eine Kalt-Preltverbindung setzt sich aus folgenden Elementen zusammen: Dem Armco-Eisen als Grundwerkstoff, dem Aluminium als Lot und den beiden Verbindungsflächen Eisen-Aluminium. Armco-Eisen und Aluminium haben unterschiedliche Werte des E-Moduls und der Querkontraktionszahl, ferner unterschiedliche Fließgrenzen, die überdies durch die vorausgegangene Kaltverformung sehr gesteigert worden sind. Auch der Trennwiderstand beider Metalle ist sehr verschieden. Ist nun das Formänderungsvermögen eines Werkstoffes auf irgendeine Weise stark vermindert, so kann der Verformungswiderstand den Trennwiderstand übersteigen, was sich beim Zerreißversuch in einem Trennbruch äußert. Dies trifft auf die hergestellten Kalt-Preltverbindungen zu. Beim Zerreißversuch ergab sich ein Trennbruch ohne meßbare Brucheinschnürung.

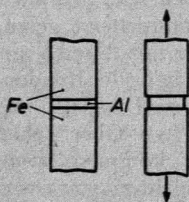


Abb. 11. Unterschiedliche Querkontraktion einer Verbindung Eisen-Aluminium-Eisen bei angenommener freier Verschiebbarkeit der beiden Werkstoffe (schematisch)

Die Behinderung der Verformung an den beiden Schweißstellen im Zugversuch ergibt sich entsprechend Abb. 11 daraus, daß bei freier gegenseitiger Beweglichkeit der Werkstoffe im elastischen Bereich das Eisen eine Querdehnung von

$$\frac{\mu_{Fe} \cdot \sigma}{E_{Fe}} = \frac{0,3}{21\,000} \cdot \sigma = 0,143 \cdot 10^{-4} \sigma,$$

das Aluminium eine solche von

$$\frac{\mu_{Al} \cdot \sigma}{E_{Al}} = \frac{0,36}{7000} \cdot \sigma = 0,515 \cdot 10^{-4} \sigma$$

erfährt. Da in Wirklichkeit die Schweißung eine Querverschiebung der verschiedenen Werkstoffe verhindert, entstehen bei Anlegung einer Zugkraft an den Zerreistab in der Nähe der Verbindungsflächen Querspannungen, und zwar im Aluminium Zug-, im Eisen Druckspannungen. Die Verformung des Aluminiums wird durch den so aufgebauten dreiachsigen Zugspannungszustand behindert, so daß der Trennbruch an der schwächsten Stelle der Lötverbindung eintritt.

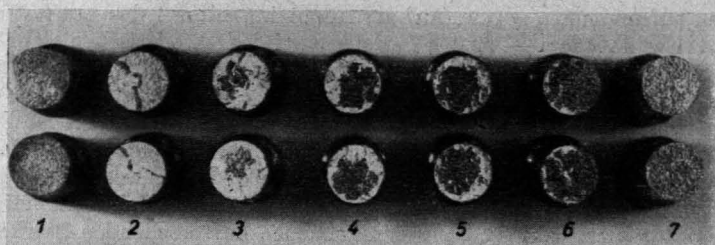


Abb. 12. Aussehen der Bruchflächen mit steigender Preßkraft von 1 nach 7. Dicke der eingelegten Ronde 3 mm. Bezeichnungen siehe Zahlentafel 1

Daß das Einreißen nicht an Fehlstellen in der Bindung beginnen muß, soll im folgenden dargelegt werden. Abb. 12 zeigt die charakteristischen Bruchflächen von Proben, die mit unterschiedlicher Preßkraft verschweißt wurden.

**Zahlentafel 1**

Preßkraft, Preßdruck, Oberflächenvergrößerung des Armco-Eisens und Zugfestigkeit der in Abb. 12 dargestellten Proben

Probe Nr.	Preßkraft (t)	Preßdruck (kg/mm <sup>2</sup> )	$\Delta F/F_0$ (%)	$\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )
1	5,0	44,2	50	0,8
2	8,0	49,1	116	6,8
3	10,0	53,7	147	17,0
4	12,0	56,1	183	13,5
5	15,0	61,7	222	12,0
6	17,5	68,9	237	15,0
7	25,0	82,8	299	12,0

In Zahlentafel 1 sind die dazu gehörigen Werte vermerkt. Bei Probe 1 ist die Bindung zwischen Aluminium und Armco-Eisen entsprechend der kleinen Verformung noch sehr gering. Der Bruch erfolgte in der Schweißnaht, da sie die geringste Trennfestigkeit aufwies, und zwar immer nur in einer der beiden Schweißnähte. Trotz der geringen Bindung sind aber schon Aluminium- und auch Eisenteilchen aus ihrem Verband gerissen worden. Der obere Teil von Abb. 13 zeigt ein Funkenspektrum, das für diese Probe am Quarzspektro-

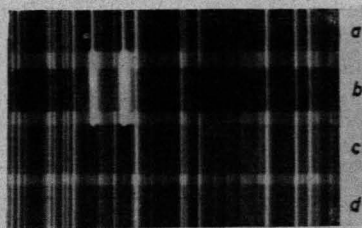


Abb. 13. Spektralaufnahmen der Bruchflächen zweier Proben

- |   |                       |
|---|-----------------------|
| a) Armco-Eisen mit geringen Anteilen von Aluminium (Fe-Seite) | } Probe 1 von Abb. 11 |
| b) Aluminium mit geringen Anteilen von Eisen (Al-Seite)       |                       |
| c) Reines Armco-Eisen (Al-Seite)                              | } Probe 7 von Abb. 11 |
| d) Reines Armco-Eisen (Fe-Seite)                              |                       |

graphen aufgenommen wurde. Auf der Aluminiumseite — das Lot hatte eine Dicke von etwa 1 mm — sind neben den zwei charakteristischen, sehr stark erscheinenden Aluminiumlinien bei den Wellenlängen 3944,0 und 3961,5 ÅE auch die Linien des Eisenspektrums vorhanden. Dies beweist, daß eine wenn auch geringe Menge Eisen aus seinem Verband gerissen worden ist. Es ist nicht anzunehmen, daß im Reinstaluminium 99,99 eine derart große Beimengung von Eisen vorhanden ist. Die Eisen­seite der Trennaht zeigt neben dem Spektrum des Armeo-Eisens dieselben zwei Aluminiumlinien, natürlich in einer der herausgerissenen Aluminiummenge entsprechenden Stärke. Bei Probe 2 ist infolge größerer Preßkraft die Verschweißung bereits weiter fortgeschritten. Der Bruch erfolgte in beiden Schweißnähten und trennte die Lotronde dabei in zwei Teile. Der silberne Glanz zeigt, daß Aluminiumteilchen in größerer Menge aus ihrem Verband gerissen worden sind und am Eisen haften. Die Fleckigkeit der Bruchflächen läßt darauf schließen, daß auch Eisenteilchen am Aluminium sitzen. Die Bruchflächen sind bedeutend rauher als bei Probe 1. Probe 3 hat bereits die maximal erzielbaren Festigkeitswerte erreicht, die Verschweißung kann also nicht mehr verbessert werden. Das Lot ist in einige mehr oder weniger große Teile zerrissen worden, die als „Inseln“ auf beiden Bruchflächen sitzen. Der Bruch hat aber nicht in den Trennähten der beiden Metalle selbst stattgefunden, sondern es sind dünne Schichten von Aluminium auf dem Eisen haften geblieben, die man an ihrem silbernen Glanz erkennt. Eigentümlich ist, daß in der Mitte der einen Bruchfläche eine dünne Schicht von Eisen aus ihrem Verband gerissen und auf der gegenüberliegenden Seite am Lot haften geblieben ist. Mit weiter zunehmender Preßkraft vergrößert sich dieser dunkel glänzende Teil der Bruchfläche immer mehr, wie es die Proben 4 bis 6 auf Abb. 12 zeigen. Bei Probe 7 ist nur noch der dunkle Glanz des Eisens zu erkennen. Die herausgerissenen Eisenschichten erreichten in einigen Fällen sogar eine Dicke von 0,1 mm. Meistenteils erfolgte auch hier der Bruch auf beiden Seiten der Lotronde, so daß diese in mehrere Teile zerrissen wurde. Einige Male ging der Bruch aber auch auf einer Seite des Lotes glatt durch das Eisen. Das Funkenspektrum einer solchen Probe sollte entscheiden, ob die herausgerissenen Schichten reines Eisen oder eine Eisen-Aluminium-Legierung sind. Der untere Teil von Abb. 13 zeigt für beide Bruchflächen nur Linien des Eisenspektrums. Die bei Probe 1 aufgenommenen starken Aluminiumlinien setzen sich in diesem Spektrum nicht fort. Die unter den Aluminiumlinien liegenden dünnen Linien gehören einwandfrei zum Eisen, wie ein Vergleich mit einem Normspektrum für Armeo-Eisen zeigte. Zur Betrachtung der Bruchflächen ist abschließend zu bemerken, daß kein Bruch glatt durch das Lot ging und daß keine Anzeichen zu finden waren, die auf ein Einreißen infolge einer Fehlstelle im Verbund schließen ließen. Abb. 12 zeigte die merkwürdig anmutende Verlagerung der Bruchfläche in das Eisen mit zunehmender Preßkraft. Eine ähnliche Verlagerung wurde in einer Versuchsreihe mit gleicher Preßkraft durch Vergrößerung der Rondendicke erzielt.

Bei der Suche nach einer Erklärung für das Einreißen der zuletzt erwähnten Verbindungen im Stahl wird man in erster Linie an eine Versprödung des Stahles durch die sehr hohe Kaltverformung denken. Es müssen aber auch noch andere Einflüsse betrachtet werden. Mit Sicherheit kann behauptet werden, daß an der Verbindungsstelle Eisen-Aluminium Eigenspannungen vor-

handen sind. Dies folgt aus dem Verformungsmechanismus beim Kaltpreßlöten. Das Aluminium quillt beim Stauchen aus dem Lötspalt, bevor das Eisen fließt. Zwischen dem Aluminium und dem Eisen sind dabei schon die ersten punktförmigen Verschweißungen erfolgt, die wieder abscheren [9]. Somit wird das Eisen durch das ausfließende Aluminium unter Querkzugspannungen gesetzt. Der dreiaxiale Spannungszustand Achsialdruck-Querkzug im Eisen erleichtert dessen Verformung gegenüber der Verformung unter einer rein achsialen Druckbeanspruchung, wie sie ohne Folie oder bei einer sehr dünnen Folie gegeben wäre. Damit erklärt sich die oben erwähnte Tatsache (Abb. 8), daß das Eisen bei Anwendung dicker, d. h. leicht fließender Aluminiumronden unter der gleichen Druckkraft einen stärkeren Stauchwulst bildet als beim Einlegen dünner Ronden. Im Zerreißversuch hat man daher keine spannungsfreien Ausgangsproben, sondern Proben mit Eigenspannungen. Ihre Größe und ihr Einfluß auf das Ergebnis des Zerreißversuchs können nur in weiteren Versuchen abgeschätzt werden.

Die eingangs erwähnte verhältnismäßig große Streuung der Festigkeiten der Kaltlötverbindungen Stahl-Aluminium-Stahl (Abb. 4) verdient besondere Erwähnung. Zur Zeit noch laufende Versuche befassen sich mit Kaltpreßschweißverbindungen Stahl-Aluminium. Die an solchen Proben erzielten Festigkeitswerte zeigen eine wesentlich geringere Streuung. Da die Güte der Verschweißung in beiden Verbindungsarten die gleiche sein dürfte, wird man die stärkere Streuung der Festigkeitswerte bei der Kalt-Preßlötung mit dem oben angedeuteten besonderen Beanspruchungszustand der Zerreißstäbe Stahl-Aluminium-Stahl in Zusammenhang bringen.

Einige Proben der in Abb. 4 dargestellten Versuchsreihe wurden einer Wärmebehandlung unterzogen. Eine Glühung bei 300 °C dürfte eine Rekristallisation des Al 99,99 herbeigeführt und auch schon zu einer gewissen Kristallerholung des Armco-Eisens geführt haben. Bemerkenswert war die so erzielte bedeutend geringere Streuung der Festigkeitswerte. Auch hierbei wurde noch über die ganze Bruchfläche hin eine dünne Eisenschicht aus ihrem Verband gerissen. Die bei 550 °C geglühten Proben fielen beim Drehen auseinander. An den Berührungsflächen von Aluminium und Eisen hatte sich eine spröde Schicht von intermetallischen Verbindungen gebildet, wie es nach dem Zustandsschaubild Aluminium-Eisen zu erwarten war.

### Zusammenfassung

Unter Kalt-Preßlötung wird ein Verfahren verstanden, bei dem man zwischen die zu vereinigenden Flächen eine Folie aus einem weicheren Metall legt und bei Raumtemperatur eine Druckkraft in solcher Höhe wirken läßt, daß die Folie und anschließend auch der Grundwerkstoff erheblich gestaucht werden. Systematische Versuchsreihen an Ronden aus Reinstaluminium zwischen Armco-Eisen ergaben die für den Eintritt der Verschweißung und die Erreichung höchster Festigkeitswerte notwendigen Stauchdrucke und Oberflächenvergrößerungen. Dabei zeigte sich, daß unter sonst gleichen Arbeitsbedingungen die Verschweißung umso früher einsetzt und umso höhere Festigkeitswerte liefert, je dicker die Folie gewählt wird. Das gleiche Ergebnis wurde auch an Ronden aus Aluminium 99,5% erzielt. Wenn man die günstigste Dicke



von 3 oder 4 mm anwendet, erhält man bei einer Oberflächenvergrößerung des Eisens von 150% und darüber Festigkeiten des Verbundes im Bereich von 10 bis 20 kg/mm<sup>2</sup>. Die Abhängigkeit der Festigkeitswerte der Verbindungen von der Dicke der Zwischenschicht führte zu der Ansicht, daß die Verschweißung zwischen Aluminium und Eisen umso leichter erfolgt, je weniger die Metalle an der Berührungsfläche verfestigt sind. Mit Hilfe von Zinnfolien wurden bei entsprechendem Stauchdruck unabhängig von ihrer Dicke Festigkeiten der Verbindungen von 4 bis 8 kg/mm<sup>2</sup> erzielt. Ronden aus Kupfer führten zu Festigkeiten von 14 bis 26 kg/mm<sup>2</sup>. Der in den Zerreißversuchen erhaltene Trennbruch gab zu einer Betrachtung der besonderen Beanspruchungsverhältnisse in den Zerreißstäben Anlaß.

In früheren theoretischen Betrachtungen wurde die Kaltschweißung auf die starke Annäherung der beiden Oberflächen bis in den Bereich atomarer Kraftwirkungen ohne Legierungsbildung durch räumliche Diffusion zurückgeführt. Diese Auffassung wird durch die Tatsache gestützt, daß sich sogar Metalle verschweißen lassen, die wie Aluminium und Blei sich nicht einmal im flüssigen Zustand merklich legieren. Weitere Arbeiten über die Grundlagen der Kaltschweißung sind im Gange.

Zum Abschluß dieser Arbeit sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die gewährte Unterstützung ergebenst gedankt.

### Literatur

- [1] Bericht Werkstoffausschuß VdEh, St. u. E. 44 (1924) S. 147.
- [2] Hofmann, W. u. Ruge, J., Z.VDI 95 (1953) S. 233.
- [3] Hofmann, W. und Groove, K., Z. Metallkunde, 45 (1954) S. 514.
- [4] Valentin, B., Diplomarbeit T. H. Braunschweig 1954.
- [5] Kuntze, W., Arch. f. Eisenhüttenwesen 2 (1928) S. 109.
- [6] Kuntze, W. in Sachs, G. und Weerts, J., Aluminium 3/4 (1931/32) S. 183.
- [7] Colbus, J., Schw. und Schn. 6 (1954) S. 287.
- [8] Siebel, E. und Pomp, A., Mitteilg. K.-W.-J. f. Eisenforschg. 9 (1927) S. 157.
- [9] Bowden, F. P. und Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, Oxford 1950.